

光電子放出に関する二、三の実験について

菅 原 行 夫

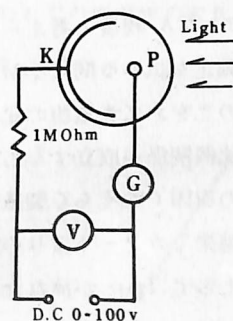
1 はじめに

亜鉛などの金属板に紫外線を照射すると、金属表面から外部に電子が放出され、金属は正に帯電する。この現象は外部光電効果といわれ、光電管の原理として広く知られ、黒体放射とともに量子論展開の実験的基礎を形成するものとしてたいせつなことはいうまでもない。

近年、高等学校物理において実験による量子概念の指導の重要性が認識され、その実験法、指導法が検討されるようになった。筆者は光量子、および光量子と電子の相互作用について実験による指導を展開すべく、市販の光電管によるプランク定数・仕事関数・金属内の伝導帯における電子の分布・放出電子の空間分布の測定などについての実験を試みたので、それらに関して報告したい。

2 光電流の測定

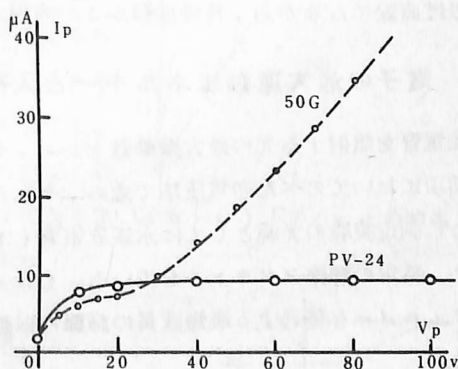
光の照射をうけた光電面 (K) が放出する電子を光電流として計測する。このとき光電管を使用するのであるが、その基本回路を (図-1) に示した。光電流の測定には $0.01\mu\text{A}$ まで測定可能な検流計、真空管電圧計を使用する。非常に微小な光電流を測定するのであるから回路全体のシールドにじゅうぶん留意し、誘導による測定誤差をふせがねばならない。また、光電管には不必要な光が入射しないように注意する。電源としては出力電圧 100V の直流電源装置、逆電圧をかけるときは乾電池を用いたポテンションメーター回路を使用する。



(図-1) 光電管回路

この回路を用い、陽極電圧 (V_p) による光電流 (I_p) の変化を測定した結果を (図-2) に示した。 $100\text{V} \cdot 100\text{W}$ の白熱燈を光電管から 60cm の距離においた。

50 G はガス封入光電管といわれ、封入されているアルゴンなどの気体が微弱な光電流によって電離され、 I_p を増幅して測定するものである。したがって、光電流自体の変化を忠実に示すものではない。これに対して、PV-24 は管内は真空であり、 I_p の変化は光電流自体の変化を示すと考えてさしつかえはない。



(図-2) 光電管の特性曲線

今回の実験は光電流の変化から、光電面における電子の放出を考察するのであるから真空型の PV-24, PV-23A を使用する。

3 光電子の運動エネルギー

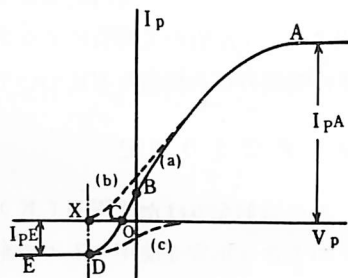
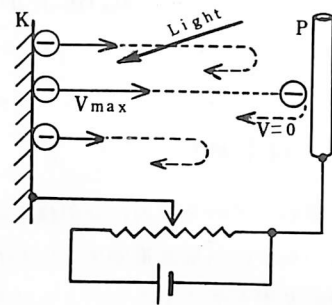
光電効果によって金属表面から放出される電子の運動エネルギーは、与えられる光のエネルギーを越

えない。したがって(図-3)に示すように、K・P間に逆電圧をかけ、光電流 I_p を 0 とする電圧 V_0 をもとめ、電子のもつ最大運動エネルギー E_m を電子ボルト単位でもとめることができる。電子の質量を m 、電荷を e 、最大速度を v_m とすれば、次の式が成立する。

$$E_m = (m v_m^2) / 2 = e V_0 \quad \cdots \cdots (1)$$

(図-4)はPV-24の光電面に単色光を一様にあてたときの光電流の変化を模式的に示したものである。 $V_p = 0$ で、KからPに流れる I_p がOBだけ存在する($I_p > 0$)、 V_p の逆電圧を増大するとともに I_p は減少し、Dにおいて逆方向の電流(PからKへの電子流、(図-3)運動エネルギーの測定 $I_p < 0$)が飽和する。この特性曲線の変化から、KからPへの電子流が0となる逆電圧をどのように定めるかが問題となる。

このPからKへの逆方向への電子流の原因としては暗電流(熱電子流、管内・口金のリーク電流)が考えられるが、暗電流全体として最大 $0.01 \mu A$ 程度と考えられ、この現象を説明することはできない。この測定を試みる間に、おもしろいことを見出した。管にいろいろの強度の光をあて光電流の変化を調べると、飽和電流値 I_{pA} と I_{pE} の間に比例関係が成立することである。このことから、プレートになんらかの原因(おそらく製造過程でであろう)で微量の光電物質が蒸着した結果、カソードよりの反射光によってプレート面で起きた光電効果によって I_{pE} が流れたと考えられる。したがって、測定によってえられた曲線(a)はカソードの光電物質による(b)とプレート面による(c)との和と考えられる。したがって、カソードによる光電流が0となるXは測定曲線BCE上の変曲点Dの位置から求めればよい。Dは、逆飽和電流(ED)がほぼ直線になるから、特性曲線がこの直線からはなれる点として定める。



(図-4) $V_p = 0$ 附近の光電流の変化

4 電子の最大運動エネルギーと入射光の最大振動数との関係

光電管を照射する光の最大振動数をかえ、それに応じて放出される電子のもつ最大運動エネルギー E_m を前項においてのべた逆電圧法で求め、それらの関係を考察する。

この測定実験の光源としては水銀放電管(100V, 60W)に写真用モノクロム・フィルターを組合わせ、特定の輝線スペクトルを用いる。(表-1)は(表-1)フィルターと水銀スペクトルの振動数

各フィルターを透過する最短波長の輝線の振動数を示した。

(図-5)は各フィルターを透過した光による逆電圧のもとでの光電流の変化を測定したものである。この曲線からそれぞれの振動数 ν のもとでのKからPへの光電流を0とする逆電圧を求め、電子のもつ最大運動エネルギー E_m を電子ボルトで求める。

| フィルター | 波長 (Å) | 振動数 (10^{14} 1/S) |
|-------|--------|----------------------|
| V-O60 | 5770 | 5.20 |
| V-O54 | 5461 | 5.49 |
| V-Y44 | 4348 | 6.90 |
| UV-39 | 4047 | 7.41 |

E_m と ν の測定値から描いたグラフが (図-7) である。グラフはほぼ直線上にのり、 E_m と ν の間に一次関数の関係が成立する。直線の傾きを h 、 E_m 軸との交点を $-W$ とすれば次式が成立する。

$$E_m = h \nu - W \dots \dots \dots (2)$$

アインシュタインは、この等式から光は $h\nu$ なるエネルギーをもつ光量子の流れと考え、"金属内の電子は光が照射されると、これら一こずつの光量子と単独にエネルギーの授受を行ない、金属の種類によって異なる一定のエネルギー W より大きいエネルギー ($h\nu_0$) を受けると金属外に放出される" と考えた。 W は金属内に電子を束縛しているエネルギーで、それぞれの金属固有のものであり、仕事関数と

いわれるものである。 h はプランクの定数であり、重要な基本定数であることはいうまでもない。この値は $6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ である。

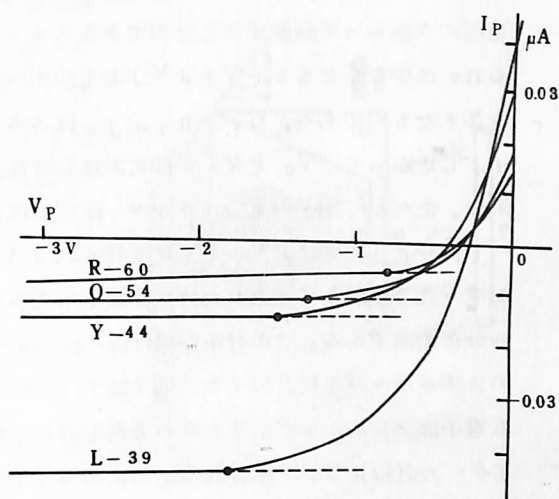
(図-6) から h, W, ν_0 を読みとると、 h は $6.64 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 、 W は 1.34 eV 、 ν_0 は $3.30 \times 10^{14} \text{ 1/s}$ となり、比較的よい値を示す。

5 金属内の光電子のエネルギー分布

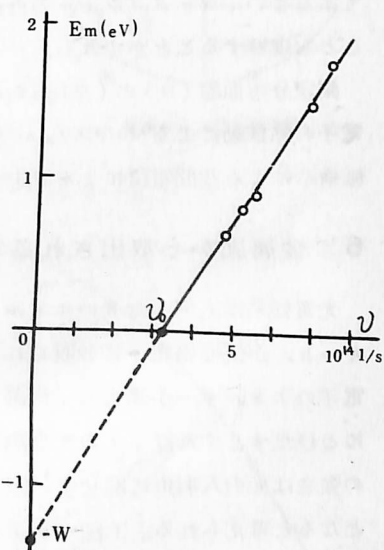
金属結晶内にある最外側電子は、結晶を構成するすべての原子核と自分以外の多数の他の電子のつくる平均的な静電ポテンシャルの中で運動し、存在する。この電子は金属結晶全体に属していると考えられ金属の熱および電気の伝導に関する諸性質のにない手となる。かかる電子の存在するエネルギー準位は帯構造をなし、伝導帯を形成する。この伝導帯にある電子が光エネルギーを受け、光電子として外部に放出される。伝導帯で最高エネルギー準位 (フェルミ準位) にある電子について考えるならば、式(2)が成立することはいうまでもない。

ここで真空型光電管の特性曲線からレナードの方法を適用し伝導帯における電子のエネルギー分布を推定する。

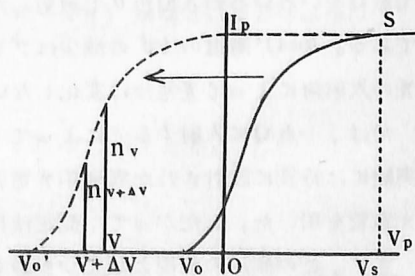
(図-7) の実線は PV-24 の概略の特性曲線である。曲線上の飽和点 S は、飽和部分に近似直線を引き、曲線と直線の交点として求める。つぎに、曲線を V_s だけ左に平行移動し、点線の曲線を求める。いま、 $V + \Delta V$ と V の間で考える。 ΔV がじゅうぶん小さいならば、この間に運動する電子の速度はほぼ



(図-5) 逆電圧のもとでの光電流の変化



(図-6) E_m と ν の関係

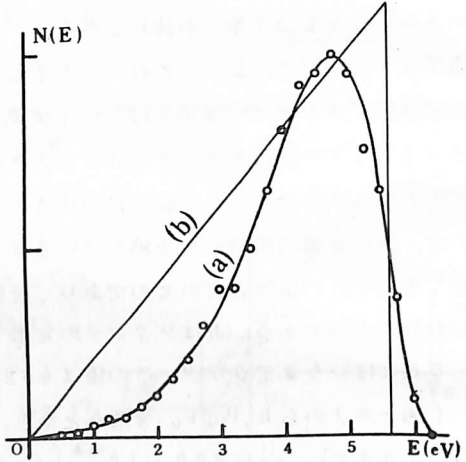


(図-7) レナード法

一定と考えられるから、 I_p の変化量は電子の数の変化量に比例する。また、 n_{v+dV} は $V+dV$ の逆電圧にさからって到達することのできるエネルギー $e(V+dV)$ 以上の電子の数である。 V に対応する n_v は少なくとも $e(V+dV)$ をもつすべての電子の数の V にさからって到達することのできる分を加えたものである。 $n_v - n_{v+dV}$ はエネルギーが eV と $e(V+dV)$ の間にある電子の数を示す。したがって、 V_0 と V_s の間における特性曲線の微分係数の変化が光電子のもつエネルギー分布を示す。ただし、電子のもつエネルギーは左に行くにしたがって大となる。

(図-8)の(a)はPV-24に波長6328 ÅのHe-Neレーザー光で照射してえられた特性曲線から求めたエネルギー分布曲線である。この分布曲線はほぼ伝導帯内での電子のエネルギー分布に近似する。量子論では伝導帯内における電子はフェルミ・ディラックの分布を示し、0°Kでは(b)の直線グラフで示される。したがって、この測定実験から、金属内の電気伝導にあづかる電子は自由電子としてふるまい、マックスウェルの分布則に従うものではないことを理解することができる。

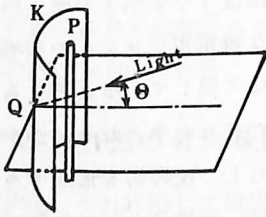
測定分布曲線(a)の(b)からのずれの原因としては、電子の熱振動によるマックスウェル分布の影響、光電管の電極構造による空間電荷による測定誤差を考慮することができる。



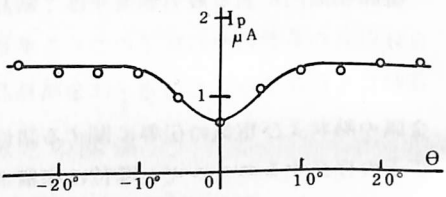
(図-8) 光電子のエネルギー分布

6 金属面から放出される電子の分布

光電効果は入射した光のエネルギー $h\nu$ が伝導帯電子に吸収され電子のエネルギーが増大し、外部にとびだすとすれば、その光電流の強さは光の入射角に関せず一定となると考えられる。(図-9)



(図-9) PV-23Aの電極構造



(図-10) 入射角による光電流の変化

に示した電極構造を持つPV-23Aを用い、He-Neレーザー光

で点Qをいろいろの入射角 θ で照射したときの I_p を測定する。(図-10)は $V_p = 40V$ の測定例である。 $\theta = 0^\circ$ 附近の I_p の減少はプレートによって光電面に光の影が生ずるからである。この測定から、光の入射角によって光電流は変化しないことがわかる。

では、一点Qに入射する光によって、電子はどのような分布で放出されるか。普通、このための測定実験には特別に設計された実験用光電管を使用するのであるが、ここではPV-23Aなる一般市販の光電管を用いた。したがって、測定法にいく分厳密さをかく点のあることをあらかじめ了承されたい。

さて、この測定の前提としてつぎの2点を仮定する。(図-11)を参照)

1. Q点に入射した光によって放出される光電子は、Qにおいて光電面に立てた法線QPに関して対称

に分布する。この分布は、光の拡散反射、電子線による螢光面からの光の放射などで成立するランベルトの余弦法則に従うと仮定する。したがって、電子は点Qにおいて光電面に接する球面Mを形成するように分布する。プレートとQによって決定される平面 α と球面との交線を円Mとする。円Mの面積が最大光電流 I_{p0} を示す。円Mの半径を N_0 とすれば

$$I_{p0} = \pi N_0^2$$

となる。平面 α と θ の角をなす平面 β を考える。平面 β に含まれる円M'の面積が θ 方向に放出される光電流 I_p となる。したがって、

$$I_p = \pi (N_0 \cos \theta)^2 = \pi N_0^2 \cos^2 \theta = I_{p0} \cos^2 \theta \dots (3)$$

となる。

ロ. Q点から放出される電子のエネルギー分布は、一般には、相当な広がりを示すが、 ν_0 に近い振動数の光ではその広がりはいずれも大きくはない。PV-23AではHe-Neレーザー光の振動数は ν_0 に近く、電子のエネルギー分布の幅はせまく、放出される電子の速度はほぼ均一と見ることができる。また、 V_p をあまり大きくしないと(0.2~0.6 V) 電場による加速も大きいとはいえない。したがって、光電子は平均的な速度でプレートに達すると考える。以上の仮定はPV-23AのPQ間の距離 $\ell = 10 \text{ mm}$ に対して、プレートの直径が1 mmもあることから許されると考えられる。

いま、光電管にコイルを巻き、光電面にそって平行に均一な磁束密度Bなる磁場を作る。この磁場内で平面 α と θ をなす方向に放出された電子はvの速度で円軌道を描き、Pに達する。(図-11)のbを参照)したがって、その円軌道の中心はQPの垂直二等分線上にあり、その半径をrとすれば次式が成立する。

$$(e/m) B = v/r, \quad r \sin \theta = \ell/2.$$

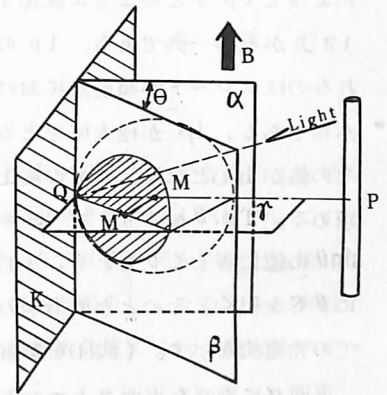
したがって、

$$B = (m/e) (2v/\ell) \sin \theta \dots (4)$$

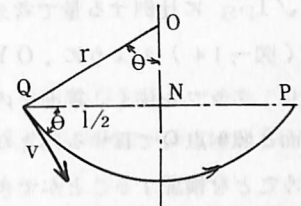
(3), (4)式から、Bによる I_p の変化は次式で示され、(図-12)のグラフとなる。

$$I_p = I_{p0} \left(1 - \frac{e^2}{m^2} \cdot \frac{\ell^2}{4v^2} \cdot B^2 \right) \dots (5)$$

以上のことがらを測定によって検証する。光電管に光の入射孔(径1.5 mm)をもつコイル(径30 mm 長さ40 mm, 巻き数240)をかぶせ、光電面をレーザー光で照射し、電子を放出させる。照射面は径1

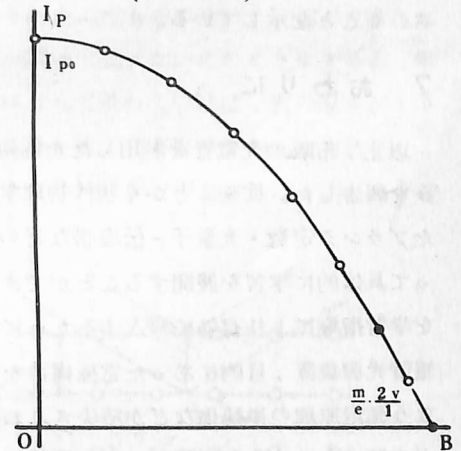


(a) ランベルトの余弦法則



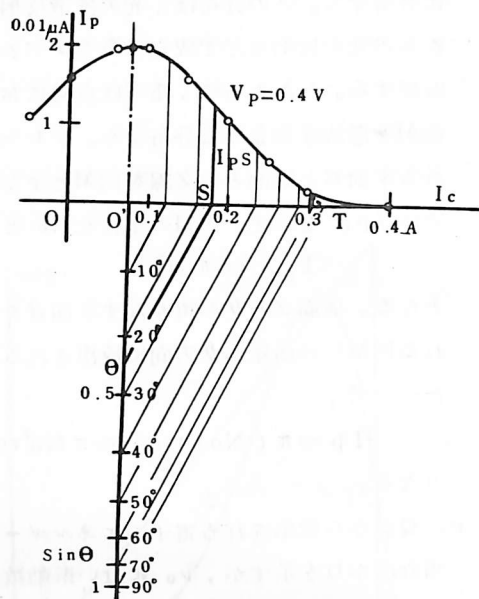
(b) 電場による電子の飛跡

(図-11)



(図-12) 推定されるBによる I_p の変化

mmの円形である。V_pを一定にし、コイルに流す電流I_cによってI_pがどのように変化するかを測定する。(図-13)がその一例である。I_pの極大値がI_c=0からずれるのはプレートが照射点における法線上からずれているからである。I_pが極大値をとるO'の位置がθ=0でありその値がI_{p0}となる。I_pの変化から外挿法によりT点を求める。Tがθ=90°でI_p=0の点を示す。O'X上にsinθの値に等しくθをとる。90°とTを結び、これに平行にθSを引く。そのときのI_{ps}の値がαとθの角をなす面での光電流を示す。(式(4)を参照)

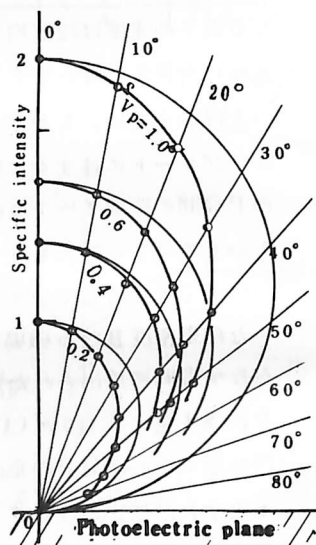


(図-13) I_pのI_cによる変化

平面αに垂直な平面r上での電子の分布は、(3)式から $\sqrt{I_{PS}}$ に比例する量で考えることができる。したがって(図-14)のように、OYからθの方向に $\sqrt{I_{PS}}$ を取り、グラフを描く。平面r内での電子の分布は、ほぼ光電面と照射点Qで接する円となり、ランベルトの余弦則に従うことを検証することができる。このことは、光電子の放出は光子の衝突によって起こるのではなく、光のエネルギーhνが一度電子に吸収され、あらためてエネルギーの増大した電子が金属表面から放出されることを示している。

7 おわりに

以上、市販の光電管を利用した光電効果に関する測定実験についての試みを報告した。従来、とかく現代物理学の成果として生徒に押しつけてきたプランク定数・光量子・伝導帯などの指導において、これらの実験によって具体的に学習を展開することができよう。しかし、これらの測定実験を学習指導により有効に導入するためには、適切な光学系を有する水銀放電管光源装置、目的にあった電極構造を有する光電管の開発、それにとり測定原理の単純化などが解決されねばならない。今後、これらの問題点の解決をはかると同時に、より適切な測定実験法をくふうと展開に努力して行きたい。



(図-14) 光電子の分布

文 献

- (1) 中村清二：物理実験学 原子物理学(下)(1941)河出書房
- (2) コールラウシュ：実験物理学 原子物理学(1963)東京図書
- (3) 宮沢久雄：物性物理学講座 界面現象・格子欠陥(1962)共立出版
- (4) 和田正信：光電管 1962 近代科学
- (5) 永宮健夫：岩波講座 現代物理学 固体構造と固体電子論(1955)・岩波
- (6) 文部省：高等学校 新しい理科教育(1968)東京書籍